The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Earth कितने समय तक हरीरह सकतीहै? climate model range देताहै, doomsday date नहीं

29 three-dimensional climate simulations Earth कीphotosynthetic biosphere के अलग limits आज से लगभग 1.35 से 1.87 billion years के बीच रखतीहैं। values rock weathering, heat और plants द्वाराउपयोग कएि जासकने वाले lowest carbon-dioxide levels के deliberately simplified paths पर depend करतीहैं। वे यह predict नहींकरतींकि all plants, all life, civilization याplanet कब खत्म होगे।

Written by Cinzia Vaglio · Cross-checked by Matteo · Edited by Michele Renda · Figures by Cinzia Vaglio and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere*, Jacob Haqq-Misra and Eric Wolf, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026) · DOI: 10.1029/2025JD045586

पृथ्वी कितने समय तक हरी रह सकती है? जलवायु मॉडल एक दायरा देता है, प्रलय की तारीख नहीं

एक पत्ता बहुत संकरी परिस्थितियों के भीतर जीता है। उसे प्रकाश, पानी, कार्बन डाइऑक्साइड और ऐसा तापमान चाहिए जिसे उसकी जैव रासायनिकी सह सके। मानव जीवनकाल में सूर्य इस समझौते को स्थिर हिस्सा लगता है। अरबों वर्षों के पैमाने पर ऐसा नहीं है।

मुख्य अनुक्रम पर उम्र बढ़ने के साथ सूर्य धीरे-धीरे अधिक चमकीला होता है। अधिक सूर्य प्रकाश पृथ्वी को गर्म करता है, लेकिन ग्रह की एक दीर्घकालिक प्रतिक्रिया भी है: वर्षा जल, कार्बन डाइऑक्साइड और सिलिकेट चट्टानों के बीच होने वाली प्रतिक्रियाएँ वायुमंडल से कार्बन डाइऑक्साइड निकाल सकती हैं। इससे ग्रीनहाउस प्रभाव कमजोर होता है और गर्माहट का कुछ हिस्सा कम हो सकता है। लेकिन ग्रह को ठंडा करने वाली यही प्रक्रिया आखिरकार प्रकाश-संश्लेषी जीवों को उस कार्बन से वंचित कर सकती है जिससे वे जीवित ऊतक बनाते हैं।

नया Journal of Geophysical Research: Atmospheres शोध पत्र पूछता है कि कौन-सी सीमा पहले आएगी: बहुत अधिक गर्मी या बहुत कम कार्बन डाइऑक्साइड। उसका उत्तर पृथ्वी की मृत्यु-तिथि नहीं है। जानबूझकर सरल बनाए गए दो भविष्य-मार्गों में प्रकाश-संश्लेषी जीवन के लिए अपनाई गई सीमाएँ आज से लगभग **1.35 से 1.87 अरब वर्ष** के बीच आती हैं।

यह दायरा **वनस्पति-आधारित जीवमंडल** (vegetative biosphere) के लिए है: पृथ्वी के जीवित तंत्र का वह हिस्सा जो प्रकाश-संश्लेषी जीवों पर टिका है, खासकर पौधों और दूसरे जीवों पर जो प्रकाश तथा कार्बन डाइऑक्साइड को जैविक पदार्थ में बदलते हैं। यह हर सूक्ष्मजीव के भविष्य का अनुमान नहीं, मानव सभ्यता की आयु नहीं और ग्रह की आयु भी नहीं।

ग्रह के “थर्मोस्टैट” में दो बड़ी अनिश्चितताएँ हैं

मुख्य अनिश्चितता **सिलिकेट अपक्षय** है। कार्बन डाइऑक्साइड वर्षा जल में घुलती है, सिलिकेट चट्टानों के साथ प्रतिक्रिया करती है और आखिरकार महासागरों तथा अवसादों की ओर जाती है। ज्वालामुखी भू वैज्ञानिक समय-मान पर कार्बन डाइऑक्साइड वापस वायुमंडल में छोड़ते हैं। मिलकर ये प्रक्रियाएँ कार्बोनेट-सिलिकेट चक्र का हिस्सा हैं, जिसे अक्सर ग्रह का “थर्मोस्टैट” कहा जाता है।

गर्म और अधिक वर्षा वाली दुनिया में अपक्षय तेज हो सकता है और कार्बन डाइऑक्साइड अधिक तेजी से हटा सकता है। लेकिन वैज्ञानिक नहीं जानते कि भविष्य के अधिक चमकीले सूर्य के नीचे यह प्रतिक्रिया पृथ्वी की जलवायु को कितनी मजबूती से नियंत्रित करेगी। इसलिए Jacob Haqq-Misra और Eric Wolf ने किसी एक मार्ग को “सही” मानकर नहीं चुना। उन्होंने दो **सीमांत परिदृश्यों** का मॉडल बनाया, अनिश्चितता की सीमा समझने के लिए जानबूझकर चुने गए दो चरम मामले।

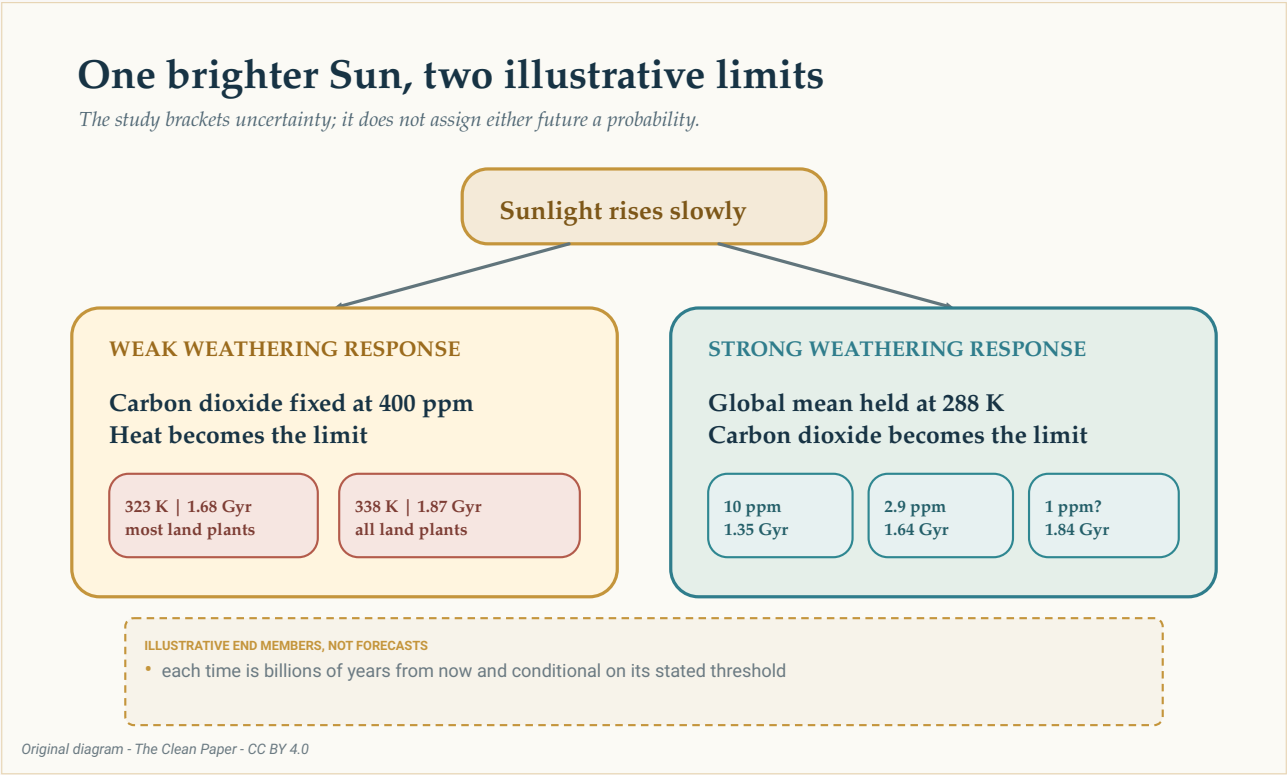
- **कमजोर-अपक्षय सीमांत परिदृश्य** में वायुमंडलीय कार्बन डाइऑक्साइड प्रति दस लाख में 400 भाग पर बनी रहती है, जबकि अधिक चमकीला सूर्य ताप मान बढ़ाता है।
- **मजबूत-अपक्षय सीमांत परिदृश्य** में वैश्विक औसत सतही ताप मान 288 केल्विन, यानी लगभग 15 डिग्री सेल्सियस, पर बना रहता है, जबकि बढ़ते सूर्य प्रकाश के साथ कार्बन डाइऑक्साइड घटती जाती है।

दोनों में से कोई भी शाखा पृथ्वी का वास्तविक भविष्य होने का दावा नहीं करती। पहली पूछती है कि कार्बन डाइऑक्साइड ऊँची बनी रहे तो बढ़ती गर्मी क्या करेगी। दूसरी पूछती है कि अपक्षय वैश्विक ताप मान को आज के औसत के पास बनाए रखे तो कार्बन की कमी क्या करेगी।

अपक्षय थर्मोस्टैट कीतरह कैसे कम कर सकताहै?

यह उपमाफीडबैक समझने के लिए है, कसीवास्तवकि नयिंत्रण-घुंडीके लिए नहीं। यदि गर्म जलवायु रासायनकि अपक्षय तेज करे, तोअधकि वायुमंडलीय कार्बन डाइऑक्साइड घुले हुए पदार्थ, खनजिोऔर अवसादोंमें जासकती है। इस ग्रीनहाउस गैस कोहटानाशुरुआतीगर्महट के कुछ हस्सिे काप्रतरिोध करताहै। बहुत लंबे समय-मान पर ज्वालामुखीय गैस-उत्सर्जन कार्बन डाइऑक्साइड वापस लाताहै।

इस शृंखलाकीहर कड़ीकीतकनत वर्षा, खुलीचट्टान, अपरदन, जीववज्ञान, प्लेट ववितर्ननकीऔर महासागरीय रसायन पर नर्भिर करतीहै। इसलिए शोधपत्र इस “थर्मोस्टैट” कोपूरीतरह ज्ञात मशीन मानने के बजाय उसकी संभावति सीमाओं कोपरखताहै।



शोधपत्र अनश्चिति भविष्य कोदोउदाहरणात्मक सीमांत परदृश्योंसे बाँधताहै। अपक्षय कीप्रतक्रियाकमजोर होतोबढ़तीगर्मी अपनाई गई स्थलीय-पौधासीमांतक पहुँचतीहै। प्रतक्रियामजबूत होतोगरितीकार्बन डाइऑक्साइड अपनाई गई प्रकाश-संश्लेषण सीमांतक पहुँचतीहै। ये शर्तोपर नर्भिर मॉडल शाखाएँ हैं, संभावनाएँ याउलटीगनितीकीतारीखें नहीं।

The Clean Paper CC BY 4.0

29 स्थरि मॉडल-दुनयिाएँ, दोअरब वर्षोंकीफ़ल्मि नहीं

शोधकर्ताओं ने ExoCAM, एक त्रि-आयामीवैश्वकि जलवायु मॉडल, से अधकि सौर इनपुट और कम कार्बन डाइऑक्साइड के अलग-अलग संयोजनोंपर **29 स्थरि-अवस्थाजलवायु** नकिाली। हर ममला70 मॉडल-वर्ष चला। यहाँएक मॉडल-वर्ष स्थरि परस्थितियिोंके नीचे एक अनुकरणति वर्षाका चक्र है: कृत्रमि जलवायु कोस्थरि होने देने कागणनात्मक समय, पृथ्वीके भविष्य कीसाल-दर-साल भविष्यवाणीकाएक कदम नहीं। जलवायु स्थरि होने के बाद अंतमि 20 वर्षोंकाऔसत लयिा गया।

ये 29 मामले अलग-अलग मॉडल-दुनियाएँ हैं। हर रन ग्रिड का एक बिंदु है, जो पूछता है: “इस चुनी हुई सूर्य प्रकाश और कार्बन-डाइऑक्साइड जोड़ी पर कौन-सी स्थिर जलवायु बनती है?” कम्प्यूटर ने आज की पृथ्वी से शुरू करके अगले दो अरब वर्षों तक वायुमंडल, चट्टानों, महासागरों और जीवों को लगातार विकसित नहीं किया। लेखकों ने पहले से निकले गए इन बिंदुओं के बीच दो योजनाबद्ध अपक्षय मार्ग खींचे; बिंदुओं के बीच कार्य स्तास्वयं अनुकरण नहीं किया गया।

नीचे की तालिका आधिकारिक मॉडल-डेटा अभिलेख में दिए सूर्य प्रकाश और कार्बन-डाइऑक्साइड संयोजनों को दोहराती है। केस ID केवल पढ़ने में आसानी के लिए अभिलेख के क्रम में जोड़े गए हैं। S/S0 सापेक्ष सौर स्थिरांक है: मॉडल में आने वाली सौर ऊर्जा को वर्तमान मान S0 से भाग दिया गया है। 1.2 का अर्थ आज की तुलना में 20 प्रतिशत अधिक आने वाली सौर ऊर्जा है। CO2 (ppm) हर दस लाख वायुमंडलीय अणुओं में कार्बन-डाइऑक्साइड अणुओं का अनुपात है।

केस ID	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400
20	1.143	180
21	1.143	11.25
22	1.143	6
23	1.143	1.40625
24	1.2	400
25	1.2	180
26	1.2	11.25
27	1.2	1.40625
28	1.2	0.45
29	1.2	0

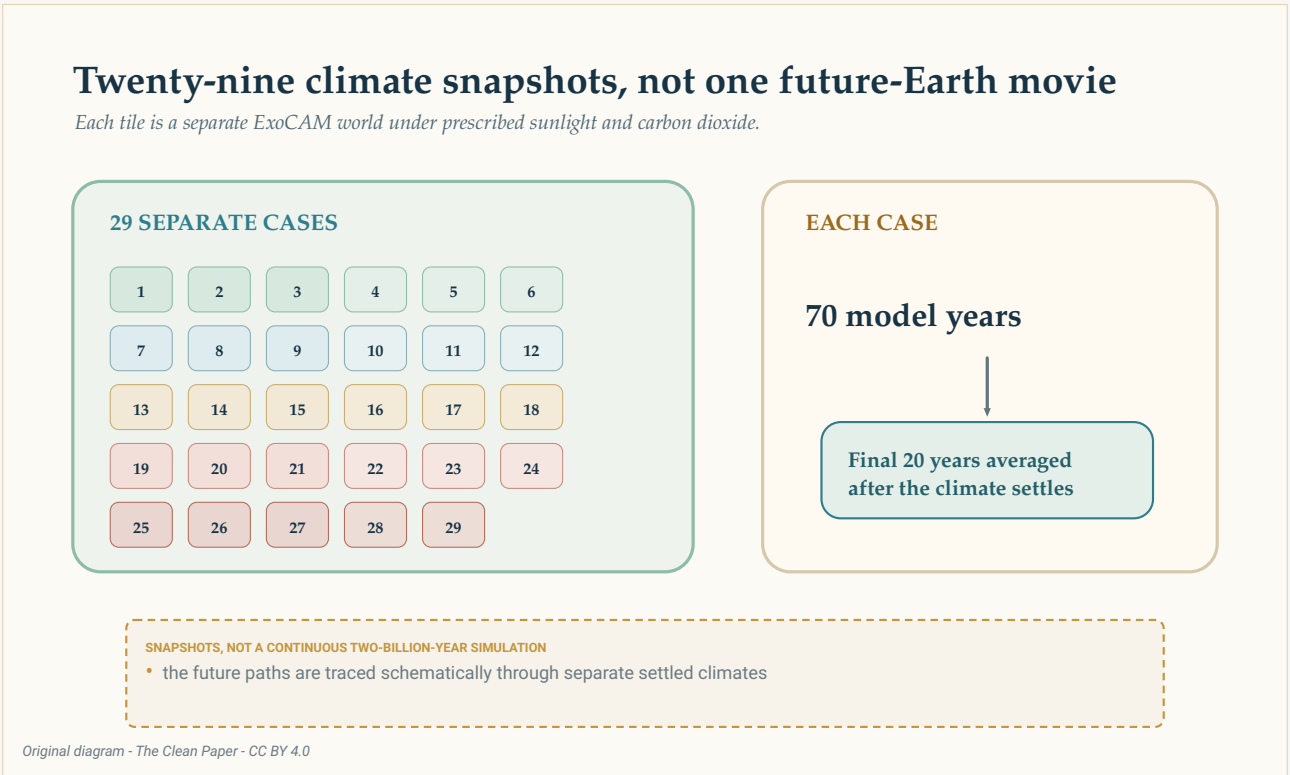
मॉडल की पृथ्वी पहचान में हमारी पृथ्वी जैसी है, लेकिन उसे जानबूझकर सीमित रखा गया है। उसका आकार पृथ्वी जितना है और वह वर्तमान भूगोल इस्तेमाल करती है। पूरी तरह परिसंचरित महासागर की जगह सरल स्लैब महासागर है, वायुमंडलीय दाब लगभग मौजूदा पृथ्वी के समान (एक बार) पर रखा गया है और मीथेन स्थिर है। कक्षा पूरी तरह वृत्ताकार है (शून्य विकेंद्रता) और घूर्णन-अक्ष में झुकाव नहीं है (शून्य अक्षीय झुकाव)। स्पष्ट मिट्टी, वनस्पति या बदलते जीवमंडल के फीडबैक

शमलि नहीहैं। सबसे महत्वपूर्ण बत: जलवयु मॉडल गतशिील रूप से चट्टटन-अपक्षय मॉडल से युग्मति नहीहै। दूसरे शब्दोमें ExoCAM अपक्षय कीगणनाकरके कार्बन डइऑक्सइड कोअद्यतन नहीकरताऔर फरि फीडबैक चक्र में अगला जलवयु रन नहीचलता। शोधकर्ताओं ने दोसीमति करने वले मार्ग पहले से तय कए और उन्हें 29 ममलोवले जलवयु ग्रडि के बीच खीचा।

जलवायु मॉडल में “स्थिर अवस्था” का क्या अर्थ है?

स्थरि-अवस्थाममलाऐसीमॉडल जलवयु है जसि चुने हुए सूर्यप्रकाश और वयुमंडल के नीचे स्थरि होने दयिागया है। समिुलेशन के भीतर दनि-प्रतदिनि और सल-दर-सल मौसम बदलतारहताहै, लेकनि दीर्घकलकि औसत में बड़ाबहुत रुक जाताहै।

यह पूछने के लए उपयोगीहै, “इन परस्थितियिोमें कौन-सीजलवयु टकि सकतीहै?” यह उस भवष्यिवाणीसे अलग है कि वस्तवकि पृथ्वीपरस्थितियिोके एक समूह से अगले तक ठीक कसि रस्ते से जाएगी।



हर खंड अलग ExoCAM जलवयु रन है जो70 मॉडल-वर्ष चला और अंतमि 20 वर्षोकाऔसत लयिागया। अध्ययन ने नरि्धारति सूर्यप्रकाश और कार्बन-डइऑक्सइड परस्थितियिोंपर 29 स्थरि जलवयु नमूने लए; उसने दोअरब वर्षोंतक लगातार वकिसति होतीएक हीपृथ्वीकाअनुकरण नहीकयि।

The Clean Paper CC BY 4.0

सीमांत परिदृश्य एक: कार्बन डाइऑक्साइड पर्याप्त, गर्मी बहुत अधिक

कमजोर-अपक्षय शाखा में कार्बन डाइऑक्साइड प्रति दस लाख में 400 भाग पर स्थिर रहती है। सौर इनपुट बढ़ने पर गर्मी सीमित करने वाला कारक बनती है।

शोधपत्र पहले के काम से दो वैश्विक औसत तापमान सीमाएँ इस्तेमाल करता है:

- **323 केल्विन**, वैश्विक वार्षिक औसत के रूप में लगभग **50 डिग्री सेल्सियस**, पर दुनिया को अधिकांश स्थलीय पौधों के लिए बहुत गर्म माना जाता है। मॉडल लगभग **1.68 अरब वर्ष** में इस सीमा तक पहुँचता है।
- **338 केल्विन**, वैश्विक वार्षिक औसत के रूप में लगभग **65 डिग्री सेल्सियस**, पर दुनिया को सभी स्थलीय पौधों के लिए बहुत गर्म माना जाता है। मॉडल लगभग **1.87 अरब वर्ष** में इस सीमा तक पहुँचता है।

ये अपनाई गई जैविक सीमाएँ हैं, ऐसे साक्ष्य भी कि तापमान नहीं जहाँ हर प्रकाश-संश्लेषी जीव निश्चित रूप से विफल हो जाए। वैश्विक औसत बड़े क्षेत्रीय अंतर छिपाता है। अध्ययन यह भी देखता है कि तापमान और पानी के कौन-से संयोजन उपयुक्त रह सकते हैं, लेकिन जलवायु मानचित्र पर कोई लेबल भविष्य के हर संभावित आश्रय या अनुकूलन को सूचीबद्ध नहीं कर सकता।

सीमांत परिदृश्य दो तापमान सहनीय, कार्बन डाइऑक्साइड बहुत कम

मज़बूत-अपक्षय शाखा में वैश्विक औसत तापमान 288 केल्विन, या लगभग 15 डिग्री सेल्सियस, पर स्थिर रहता है जबकि वायुमंडलीय कार्बन डाइऑक्साइड गिरती है। यहाँ परिणाम इस पर निर्भर करता है कि अलग प्रकाश-संश्लेषी मार्ग कितने कम कार्बन पर काम कर सकते हैं।

- पारंपरिक **प्रति दस लाख में 10 भाग** की सीमा — हर दस लाख वायुमंडलीय अणुओं में 10 कार्बन-डाइऑक्साइड अणु — पर C4 प्रकाश-संश्लेषण की सीमा लगभग **1.35 अरब वर्ष** में आती है। मक्का और गन्ने सहित कई पौधे C4 प्रकाश-संश्लेषण इस्तेमाल करते हैं; यह कार्बन बाँधने वाले एंज़ाइम के आसपास कार्बन डाइऑक्साइड को केंद्रित करता है।
- पहले के काम में चर्चा की गई वैकल्पिक **प्रति दस लाख में 2.9 भाग** की C4 सीमा इसे लगभग **1.64 अरब वर्ष** तक ले जाती है।
- अस्थायी **प्रति दस लाख में 1 भाग** की सीमा जिसे कुछ CAM पौधों — क्रैसुलेसियन एसिड मेटाबॉलिज्म इस्तेमाल करने वाले पौधे, जो कार्बन-डाइऑक्साइड ग्रहण को रात और उपयोग को दिन में अलग करते हैं — या घुले हुए बाइकार्बोनेट का इस्तेमाल करने वाले जलीय पौधों की संभावित टिकाऊ क्षमता से जोड़ा गया है, सीमा को लगभग **1.84 अरब वर्ष** तक ले जाती है।

आखिरी संख्या पर सबसे बड़ी जैविक सावधानी लागू होती है। लेखक प्रति दस लाख में एक भाग की सीमा को स्पष्ट रूप से अस्थायी कहते हैं। यह भविष्य की पृथ्वी जैसी परिस्थितियों में सभी CAM पौधों या जलीय वनस्पति के लिए प्रयोगों से स्थापित जीवित रहने की सीमा नहीं है।

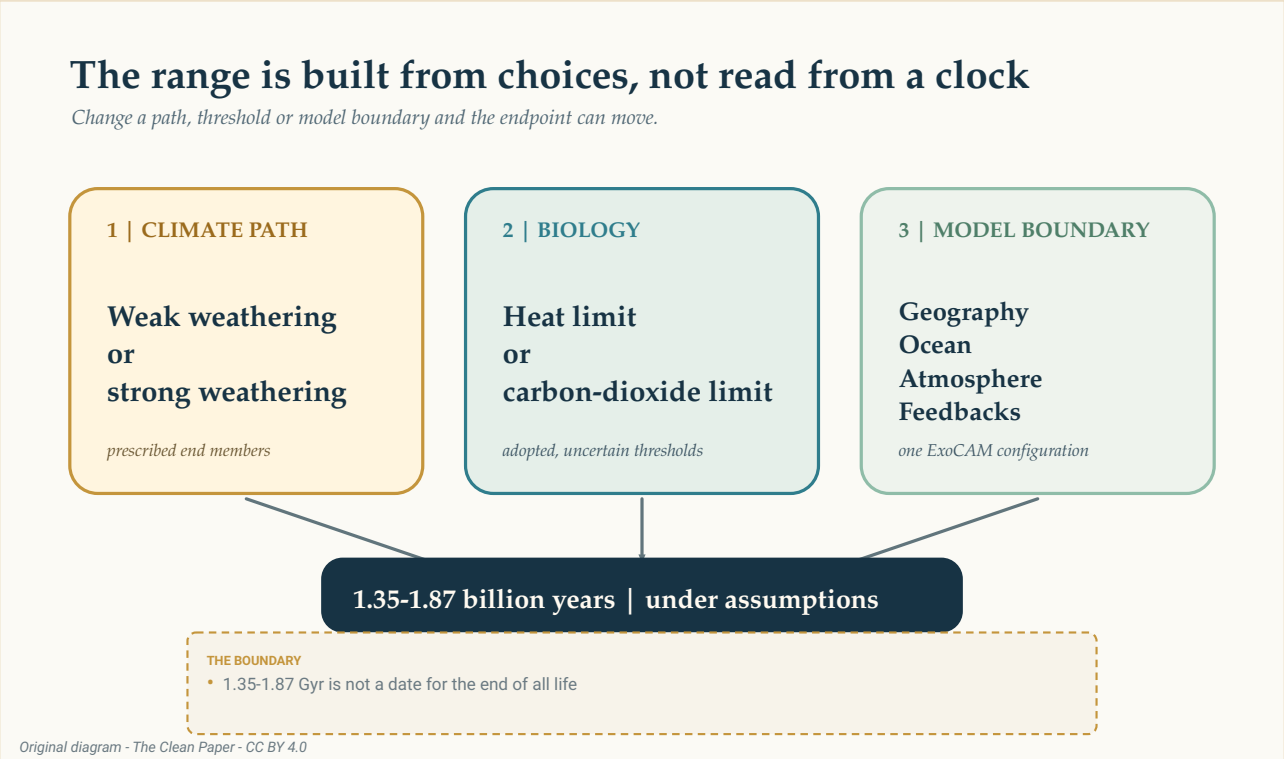
C3, C4 और CAM अलग रणनीतियाँ हैं, कोई सीढ़ी नहीं

पौधे कार्बन ग्रहण करने के लिए अलग जैवरासायनिक रास्ते इस्तेमाल करते हैं। **C3 प्रकाश-संश्लेषण** सबसे सामान्य है। **C4 प्रकाश-संश्लेषण**, मक्का और गन्ने जैसे पौधों में, कार्बन बाँधने वाले एंजाइम के आसपास कार्बन डाइऑक्साइड को केंद्रित करता है और कम कार्बन डाइऑक्साइड में बेहतर काम कर सकता है। **क्रैसुलेसियन एसिड मेटाबॉलिज़्म** (CAM) कार्बन ग्रहण और उपयोग को रात तथा दिन में अलग करता है, जिससे कई पौधे पानी बचाते हैं। ये अनेक प्रजाति-स्तरीय अंतरों वाले रणनीति-समूह हैं, "बेहतर" पौधों की क्रमिक सीढ़ियाँ नहीं। शोधपत्र में बहुत कम कार्बन-डाइऑक्साइड की सीमाएँ संभावित छोरों को परखने के लिए रखी गई धारणाएँ हैं; इसकी कोई गारंटी नहीं कि भविष्य के पारितंत्र उन्हें इस्तेमाल करने के लिए विकसित होंगे।

1.86 अरब वर्ष कोई अंतिम तारीख क्यों नहीं है

शोधपत्र का प्रमुख अनुमान, लगभग **1.86 अरब वर्ष**, दो आशावादी ऊपरी अंतिम बिंदुओं का औसत है: कार्बन-डाइऑक्साइड-सीमित शासन में 1.84 अरब वर्ष और गर्मी-सीमित शासन में 1.87 अरब वर्ष। यह दो अलग परिदृश्यों का संक्षिप्त सार है। यह अधिक सटीकता वाला कोई तीसरा मॉडल-नतीजा या "सबसे अच्छा" अनुमान तिथि नहीं है।

व्यापक 1.35 से 1.87 अरब वर्ष का दायरा भी कोई एकल प्रायिकता-वितरण नहीं है। निचला और ऊपरी मान अलग अपक्षय धारणाओं, अलग जैविक सीमाओं और एक जलवायु-मॉडल विन्यास पर निर्भर करते हैं। यह दायरा समय के साथ-साथ मॉडल में किए गए चुनावों को भी दर्शाता है।



1.35 से 1.87 अरब वर्ष का दायरा अपक्षय मार्ग, जैविक सीमा और मॉडल की सीमाएँ चुनने के बाद ही निकलता है। यह धारणाओं का नक्शा है, समस्त जीवन के विलुप्त होने तक उलटी गिनती करती घड़ी नहीं।

The Clean Paper CC BY 4.0

दूसरी सीमाएँ पहले आ सकती हैं

वनस्पति-आधारित जीवमंडल के सबसे लंबे अनुमान एक दूसरी अनिश्चित सीमा के पास आते हैं: नम या अनियंत्रित ग्रीनहाउस अवस्था, जो बड़े पैमाने पर महासागरीय जल-हानि चला सकती है। बढ़ते सूर्यप्रकाश के नीचे ये अवस्थाएँ कब शुरू होंगी, खासकर वर्तमान परिस्थितियों से बहुत दूर, इस पर जलवायु मॉडल काफ़ी असहमत हैं। कुछ अनुमान इन्हें सबसे आशावादी प्रकाश-संश्लेषण सीमा से पहले रखते हैं।

इसका अर्थ है कि ऊपरी शाखा को इस बड़े की तरह नहीं पढ़ा जा सकता कि पृथ्वी 1.87 अरब वर्ष तक महासागर, परिचित महाद्वीप या रहने योग्य सतही परिस्थितियाँ बनाए रखेगी। मॉडल भविष्य की प्लेट विवर्तनिकी, स्थलीय क्षेत्रफल में बदलाव, विकसित होते पार्थिव या पूरी तरह गतिशील महासागर को भी शामिल नहीं करता। वायुमंडल ऊर्जा को कैसे अवशोषित और उत्सर्जित करता है, उसकी गणनाओं को भी तीव्र सूर्यप्रकाश और अत्यंत कम कार्बन डाइऑक्साइड वाले क्षेत्रों तक बढ़ाया जा रहा है, जहाँ मॉडल एक-दूसरे से अलग होने लगते हैं।

विकासवादी अनुकूलन और तकनीकी हस्तक्षेप शोधपत्र की चर्चा में संभावनाएँ हैं। वे 29 जलवायु सिमुलेशनों के नतीजे नहीं हैं। मॉडल भविष्य के जीवों को प्रति दस लाख में एक भाग वाली प्रकाश-संश्लेषी सीमा के अनुकूल विकसित होते नहीं दिखाता, न किसी सभ्यता को अरबों वर्षों तक वायुमंडल का प्रबंधन करते।

यह आज के जलवायु संकट के बारे में निष्कर्ष नहीं है

सूर्य की चमक में बढ़ोतरी करोड़ों से अरबों वर्षों के पैमाने पर काम करती है। आधुनिक मानव-जनित ग्रीनहाउस गैसों से आती है। दोनों अलग प्रेरक प्रभाव हैं, बिल्कुल अलग समय-मान पर, और अलग सवालों के जवाब हैं।

इस अध्ययन में कुछ भी मौजूदा जलवायु परिवर्तन के सापेक्ष्य को कमजोर नहीं करता और न कार्रवाई टालने का कोई तर्क देता है। दूर के मॉडल-परिदृश्य में कुछ प्रकाश-संश्लेषी जीवन बनाए रख सकने वाला जीवमंडल उस जलवायु के समान नहीं है जिसमें आज के समाज और पारिस्थितिक सुरक्षित रह सकें।

शोधपत्र का मूल्य यह है कि वह बहुत दूर के सवाल को अधिक व्यवस्थित बनाता है। यह दिखाता है कि पहले के सरल मॉडल, सूर्यप्रकाश बढ़ने पर कार्बन डाइऑक्साइड को स्थिर रखकर, शायद बहुत अधिक गर्मी दिखाते थे; और प्रकाश-संश्लेषी जीवन के पास किसी एक मानक कार्बन सीमा से आगे टिके रहने के रास्ते हो सकते हैं। साथ ही यह भी दिखाता है कि अरब वर्ष का हर अतिरिक्त अंश धारणाओं की पूरी शृंखला के साथ आता है।

पत्ते को ऊर्जा देने वाला सूर्य धीरे-धीरे बदल रहा है। पृथ्वी 1.35, 1.87 या किसी दूसरी संख्या में अरब वर्षों तक हरी रहती है या नहीं, यह चट्टानों, पानी, वायुमंडल और जीवन की परस्पर जुड़ी प्रतिक्रियाओं पर निर्भर करेगा। ईमानदार नतीजा कोई तारीख़ नहीं है। यह उस लंबे समझौते की अधिक व्यापक तस्वीर है।

साफ़ सारांश

यह त्रि-आयामी जलवायु अध्ययन पूछता है कि सूर्य के धीरे-धीरे अधिक चमकीला होने पर पृथ्वी का वनस्पति-आधारित — यानी प्रकाश-संश्लेषी— जीवमंडल कितने समय टिक सकता है। शोधकर्ताओं ने 29 अलग स्थिर-अवस्था जलवायु की गणना की और उनके बीच दो उदाहरणात्मक सीमांत परिदृश्य खींचे। कमजोर अपक्षय और कार्बन डाइऑक्साइड को प्रति दस लाख में 400 भाग पर स्थिर रखने पर स्थलीय पौधों के लिए अपनाई गई गर्मी की सीमाएँ आज से लगभग 1.68 और 1.87 अरब

वर्ष में आतीहैं। मज़बूत अपक्षय और वैश्विक औसत तापमान को288 केल्विन, यानीलगभग 15 डिग्रीसेल्सियस, पर स्थिर रखने पर प्रकाश-संश्लेषण के लिए अपनाई गई कार्बन-डाइऑक्साइड सीमाएँ लगभग 1.35, 1.64 और अस्थायीसीमा के साथ 1.84 अरब वर्ष में आतीहैं। अक्सर उद्धृत 1.86 अरब वर्ष केवल दोआशावादीऊपरीअंतिम बिंदुओं कागोल कियाहुआ औसत है। ये परिदृश्य-निर्भर मॉडल-दायरे हैं — पृथ्वी, मानवतायासभीजीवन के अंत कीतारीख नहीं। मॉडल निर्धारित मार्ग, वर्तमान भूगोल, स्लैब महासागर और स्पष्ट मिट्टी-वनस्पति यानजलवायु–अपक्षय युग्मन के बिनाचलताहै, और सबसे लंबे अनुमान अनिश्चित ग्रीनहाउस/महासागर-हानि सीमाओं के करीब पहुँचते हैं।

बिनाबढ़ा-चढ़ाकर जाँच

शोधपत्र क्यादिखाताहै: इस ExoCAM विन्यास में बढ़ते सूर्यप्रकाश और स्थिर कार्बन डाइऑक्साइड के तहत त्रि-आयामीजलवायु, तुलनामें इस्तेमाल सरल मॉडल कीअपेक्षासमान्यतःकम गर्म होतीहै। दोनिर्धारित अपक्षय सीमांत परिदृश्योंऔर कई अपनाई गई जैविक सीमाओं में वनस्पति-आधारित जीवमंडल कीसीमाआज से लगभग 1.35 से 1.87 अरब वर्ष के बीच आतीहै।

क्यासंभव है लेकिन स्थापित नहीं: कुछ CAM पौधे याघुले हुए बाइकार्बोनेट काइस्तेमाल करने वाले जलीय पौधे लगभग प्रति दस लाख में एक भाग वायुमंडलीय कार्बन डाइऑक्साइड पर प्रकाश-संश्लेषण बनाए रख सकते हैं; अनुकूलन यातकनीकि प्रकाश-संश्लेषीजीवन कोऔर आगे बढ़ासकतीहै; और वास्तविक जलवायु-अपक्षय मार्ग दोमॉडल सीमांत परिदृश्योंके बीच रह सकताहै।

यह क्यानहींदिखाता: सभीपौधों, सभीजीवन, मानव सभ्यता, पृथ्वीके महासागरोंयाग्रह के अंत कीकोई तय तारीख; अगले दो अरब वर्षोंकीएक लगातार चलने वालीसिमुलेशन; यामौजूदामानव-जनित जलवायु परिवर्तन कोकम गंभीर मानने काकोई कारण।

मुख्य सीमाएँ: एक जलवायु-मॉडल परिवार के 29 स्थिर-अवस्थामामले; गतिशील रूप से युग्मित होने कीजगह पहले से निर्धारित अपक्षय मार्ग; वर्तमान भूगोल; स्लैब महासागर; स्थिर मीथेन; शून्य अक्षीय झुकाव/विकेंद्रता; स्पष्ट मिट्टी, वनस्पति याजीवमंडलीय फीडबैक काअभाव; अनिश्चित गर्मीकार्बन-डाइऑक्साइड सीमाएँ; और नम/अनियंत्रित ग्रीनहाउस परिस्थितियोंके पास मॉडलोंमें बड़ामतभेद।

सामान्य पाठक कोकितनाभरोसारखनाचाहिए? अध्ययन संभावित मॉडल-दायरे कोव्यापक करताहै और परिणाम कोनियंत्रित करने वालीधारणाओं कीपहचान करताहै — इसमें उच्च भरोसा। इस मॉडल के भीतर संख्यात्मक दायराउपयोगीहै — इसमें मध्यम भरोसा। किसीसटीक तारीख में भरोसाकम होनाचाहिए, क्योंकि दूर के अंतिम बिंदु जानबूझकर चुने गए चरम जलवायु मार्गोंऔर अनिश्चित जीवविज्ञान पर निर्भर करते हैं।

स्रोत

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026)
https://doi.org/10.1029/2025JD045586

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere: Model Data, Zenodo record 16584870
https://doi.org/10.5281/zenodo.16584870